МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

Check for updates

УДК 62-4; 622.23.05
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-238-245

Оригинальное эмпирическое исследование

Самопозиционирование и самофиксирование деталей из сплавов с эффектом памяти формы при монтаже сборочных узлов

Э.Ю.О. Балаев
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация
ООО «Промышленно-инженерная компания», г. Краснодар, Российская Федерация
✉ balaev1122@mail.ru

EDN: EWVFBZ

Аннотация

Введение. Нарушение взаимного позиционирования и фиксации деталей ухудшает работу оборудования. Достаточно изучены традиционные подходы к решению рассматриваемой проблемы: взаимозаменяемость деталей и использование специальной оснастки. Оба метода предполагают значительный объем дополнительных элементов и монтажных операций. Фиксацию часто обеспечивают с помощью посадки с натягом и сварки. Недостатки этих методов: монтажные, остаточные и другие напряжения, технические ограничения и пр. Для решения указанных проблем используют сплавы с термоупругими фазовыми превращениями, которые позволяют проявляться эффектам памяти формы (ЭПФ). В данной статье впервые описаны самопозиционирование и самофиксация на примере деталей, специально изготовленных из сплава с ЭПФ.

Материалы и методы. Исследовались стаканы из сплава с ЭПФ — Ti-55,7wt%Ni при запрессовке: штыревой элемент дорнует глухое отверстие и попадает в посадочное место. Температура начала аустенитного превращения — $A_s = 95$ °C ± 5 °C. Элементный состав определяли рентгенофлуоресцентным спектрометром Shimadzu EDX-8000, фазовый — дифрактометром Shimadzu XRD-7000. Температуру определяли дифференциальной сканирующей калориметрией. Диапазон 20–300 °C, скорость нагрева — 5 °C/мин. Задействовали тепловизор Guide T120 и 3D-сканер со структурированным подсветом RangeVision DIY. После запрессовки под разными углами штыря в стакан исследовали соосность и отклонения между осями стакана и штыря. Затем стакан нагревали до 110–120 °C, охлаждали и делали контрольные замеры.

Результаты исследования. Значения угла отклонения после запрессовки — 0,2–11°. При жесткой конструкции и угле установки 0° штырь отклоняется в посадочном отверстии на 0,2–0,5°. Оси смещаются и не пересекаются. Штырь не всегда полностью запрессовывается. Это говорит о неравномерной деформации металла и о разных по значению напряжениях вокруг отверстия. Такой узел быстро выйдет из строя. Штырь занимает требуемое положение после нагрева стакана до 110–120 °C (эта температура выше, чем в конце обратного мартенситного превращения). Отметили угловое отклонение осей — 0,03–0,1°. Максимальная несоосность (0,04 мм) соответствует высокой точности позиционирования. Нагрев при обратном мартенситном превращении создает внутренние напряжения, возвращающие первоначальную геометрию стакана. Они же формируют усилия, которые располагают и фиксируют штырь в отверстии. То есть именно детали обеспечивают позиционирование и фиксацию (это самопозиционирование и самофиксация).

Обсуждение и заключение. Для самопозиционирования и самофиксации деталей за счет эффекта памяти формы при конструировании следует отказаться от резких линий переходов между поверхностями деталей, выбирать скругленные углы или галтели, добиваться чистой поверхности без заусенцев. Самофиксация и самопозиционирование сокращают брак и неточности при сборке. Использование сплавов с эффектом памяти может повышать рентабельность производства.

Ключевые слова: эффект памяти формы, термоупругое фазовое превращение, самопозиционирование детали, самофиксация детали, взаимное позиционирование деталей, восстановление формы за счет возвратных напряжений

© Балаев Э.Ю.О., 2024

Благодарности. Автор благодарит кандидата технических наук, доцента Н.А. Шостака и научного сотрудника лаборатории перспективного проектирования нефтегазового оборудования Кубанского государственного технологического университета М.А. Самарина за помощь в планировании и проведении экспериментов. Автор также признателен редакционной коллегии журнала и рецензенту за компетентную экспертизу и рекомендации по улучшению статьи.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29–00547 «Разработка принципов конструирования элементов бурового оборудования с применением материалов с эффектом памяти формы» https://rscf.ru/project/23-29-00547/

Для цитирования. Балаев Э.Ю.О. Самопозиционирование и самофиксирование деталей из сплавов с эффектом памяти формы при монтаже сборочных узлов. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):238–245. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-238-245

Original Empirical Research

On Self-Positioning and Self-Fixation of Parts Made of Alloys with Shape Memory Effect under Component Assembling

Balaev Etibar Yusif Ogly

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

✉ balaev1122@mail.ru

Abstract

Introduction Violation of mutual positioning and fixation of parts worsens the operation of the equipment. Traditional approaches to solving the problem under consideration have been sufficiently studied: interchangeability of parts and the use of special equipment. Both methods involve a significant number of additional elements and assembly operations. Fixation is often provided by means of force fitting and welding. Disadvantages of these methods include assembly, residual and other stresses, engineering constraints, etc. To solve these problems, alloys with thermoelastic phase transformations are used, which provide shape memory effects (SME) to manifest themselves. This article describes, for the first time, self-positioning and self-fixation using the example of parts specially made from an alloy with SME.

Materials and Methods. The pin element under pressing mandrels the blind hole of the cup and enters the seat. The alloy with SME was Ti-55.7wt%Ni. The temperature of the onset of its austenitic transformation was A_s = 95°C ± 5°C. The elemental composition was determined by a Shimadzu EDX-8000 X-ray fluorescence spectrometer, the phase composition — by a Shimadzu XRD-7000 diffractometer. The temperature was specified through differential scanning calorimetry. The range was 20–300°C, the heating rate was 5 deg/min. A Guide T120 thermal imager and a RangeVision DIY 3D scanner with structured illumination were used. After pressing the pin into the cup at different angles, the alignment and deviations between the axes of the cup and the pin were examined. Then, the cup was heated to 110–120°C, cooled, and control measurements were taken.

Results. Values of the deflection angle after pressing were 0.2–11°. With a rigid structure and an installation angle of 0°, the pin deflected in the mounting hole by 0.2–0.5°. The axes shifted and did not intersect. The pin was not always completely pressed in. This indicated uneven deformation of the metal and different stress values around the hole. Such a unit would soon fail. The pin took the required position after heating the cup to 110–120°C (this temperature was higher than at the end of the reverse martensitic transformation). The angular deviation of the axes was noted to be 0.03–0.1°. The maximum misalignment (0.04 mm) corresponded to high positioning accuracy. Heating during the reverse martensitic transformation created internal stresses that returned the initial geometry of the cup. They also formed the forces that positioned and fixed the pin in the hole. That is, it is the parts that provide positioning and fixation (this is self-positioning and self-fixation).

Discussion and Conclusion. For self-positioning and self-fixation of parts due to the shape memory effect, it is necessary to avoid sharp transition lines between the surfaces of parts during design, select rounded corners or fillets, and get a clean surface without burrs. Self-fixation and self-positioning reduce defects and inaccuracies during assembly. The use of certain alloys increases the profitability of equipment production.

Keywords: shape memory effect, thermoelastic phase transformation, self-positioning of a part, self-fixation of a part, mutual positioning of parts, shape restoration due to return stresses

Acknowledgements. The author would like to thank N.A. Shostak, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, and M.A. Samarin, Research Associate of the Laboratory of Advanced Design of Oil and Gas Equipment, for assistance in planning and conducting experiments. In addition, the author appreciates the Editorial team of the Journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

Funding Information. The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23–29–00547 "Development of Principles for Designing Drilling Equipment Elements Using Materials with Shape Memory Effect", https://rscf.ru/project/23-29-00547/

For Citation. Balaev EYuO. On Self-Positioning and Self-Fixation of Parts Made of Alloys with Shape Memory Effect under Component Assembling. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):238–245. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-238-245

Введение. Под самопозиционированием следует понимать пространственное ориентирование, установку и позиционирование детали и сопрягаемых с ней элементов в узлах и механизмах. Самофиксация — это сопряжение по поверхностям конструктивных элементов с такими геометрическими особенностями, которые обеспечивают фиксирование сопрягаемых деталей с задаваемым усилием фиксации за счет эффекта памяти формы.

От точности взаимного позиционирования деталей зависит корректность и надежность работы механизмов. Верное позиционирование может снизить инерционность механического узла, препятствует возникновению не предусмотренных конструкцией люфтов системы. Несоблюдение требований по взаимному позиционированию деталей может менять работу изделий, что в большинстве случаев недопустимо [1].

Требования к точности сборки узлов высоки во всех отраслях, особенно в станко-, авиа-, судостроении. Для правильного, плотного сопряжения деталей задействуют метод групповой взаимозаменяемости. Часто при сборке узлов используют специальную оснастку. Как правило, она уникальна для данного типа сборочной операции, обеспечивает точность позиционирования при монтаже и выполнение требований к точности размеров, форме, расположению и чистоте поверхности [2].

В производственной практике (особенно в строительстве [3] и нефтегазовой промышленности [4]) все чаще применяются сплавы с термоупругими фазовыми превращениями, которые обеспечивают эффект памяти формы (ЭПФ). Уникальность таких сплавов — в особенностях фазовых превращений, благодаря которым проявляются эффекты памяти формы, а также сверхэластичность (псевдоупругость) [5].

Память формы в сплавах с термоупругими фазовыми превращениями используется, в частности, для силовых приводов [6]. Эффект основан на возвратных напряжениях, восстанавливающих форму детали. Явление соответствует аустенитному фазовому состоянию элементов силового привода [7]. В нефтегазовой промышленности для соединения труб используются муфтовые соединения деталей [8]. Метод предполагает восстановление формы элементов, обеспечивающих охватывание и обжатие сопрягаемых деталей [9]. За счет эффекта памяти формы при сборке можно обеспечить такие процессы, как пространственное ориентирование, установку и позиционирование. Для этого целесообразно задействовать сразу два названных выше принципа:

– охватывание и обжатие деталей;

– восстановление формы за счет возвратных напряжений, приводящих к движению.

Такой подход позволяет сократить число этапов сборки и отказаться от использования специального оборудования (оснастки) при позиционировании и фиксации детали из сплава с термоупругим фазовым превращением и для сопрягаемых с ней элементов узла.

Предложенное решение открывает возможность заменить такие способы фиксации, как посадка с натягом и сварка. Следовательно, можно избежать и недостатков этих методов — монтажных, остаточных и других напряжений. Отметим также эксплуатационные ограничения, связанные с прочностью и надежностью фиксации. К тому же не всегда технически можно выполнить посадку с натягом и сварку.

Следует указать на еще одно преимущество деталей из сплавов с термоупругими фазовыми превращениями. Их позиционирование и фиксация в сборочном узле позволяет отказаться от групповой взаимозаменяемости деталей, от пригоночных деталей и от дополнительного использования в конструкции регулирующих узлов и механизмов. Это упрощает монтаж и изготовление деталей при высокой точности позиционирования и надежной фиксации деталей в сборочном узле.

В представленной научной работе впервые предлагается использовать термоупругое фазовое превращение для позиционирования и последующей фиксации деталей в сборочном в узле. В этом случае эффект памяти формы деталей обеспечивает их самопозиционирование и самофиксацию.

Автор данной статьи наблюдал исследуемое явление при термоупругих превращениях, когда требовалось обеспечить фиксацию за счет эффекта памяти формы зубьев. В этом контексте рассматривались:

– шарошка бурового долота;

– замковый палец в лапе шарошечного долота;

– шарошка на лапе долота в конструкции шарошечного долота без замкового пальца;

– ниппель и муфты бурового замка [10];

– седла в корпусе дисковой поворотной заслонки;

– диск на штоке дисковой поворотной заслонки.

Цель работы — изучить возможности самопозиционирования (пространственное ориентирование, установка и позиционирование) и самофиксации при проявлении эффекта памяти формы сплавов с термоупругими фазовыми превращениями. Предполагается выяснить, какая точность обеспечивается в данном случае при проектировании и монтаже сборочных узлов и какие условия нужно обеспечить при сборке (конструктивные особенности, приемы, требования для реализации самопозиционирования и самофиксации).

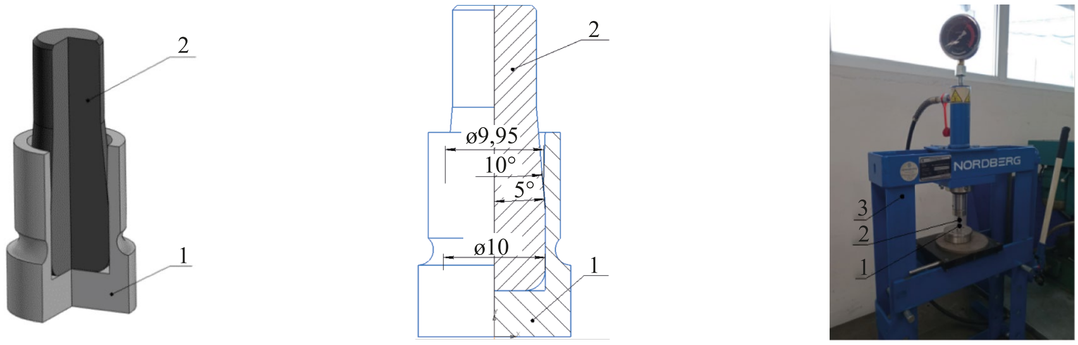
Материалы и методы. Для экспериментов изготовили два образца из сплава с термоупругим фазовым превращением. По форме это стаканы со специальным глухим отверстием и штыревым элементом из термически обработанной (закаленной) стали 40Х. У стакана есть отверстие — две конические ступени с прямым (заходный) и обратным (фиксирующий) конусом. Переходы — по радиусу и по линии пересечения конусов. У штыревого элемента форма дорна, поэтому при запрессовке в стакан он дорнует глухое отверстие и попадает в посадочное место в стакане. Все поверхности чистые, без углов и заусенцев. Таким образом обеспечиваются:

– свободное скольжение запрессовываемого штыревого элемента;

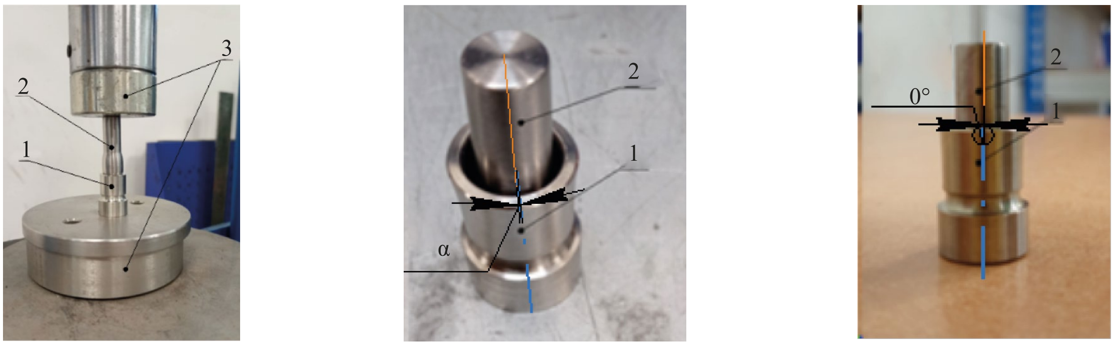
– пространственное ориентирование и установка в посадочное место под штыревой элемент в стакане;

– позиционирование штыревого элемента в посадочном месте.

На рис. 1 показаны этапы запрессовки штыревого элемента в стакан, изготовленный из сплава с ЭПФ.



а) *б)* *в)*



г) *д)* *е)*

Рис. 1. Установка штыревого элемента в посадочное место стакана из сплава с ЭПФ:
а — 3D-модель сборки элементов после установки штыревого элемента 2 в стакан 1;
б — сборочный чертеж; *в, г* — установка в ручной пресс 3 штыревого элемента 2 и стакана 1 перед запрессовкой штыревого элемента в стакан; *д* — угол между осями симметрии α после запрессовки штыревого элемента 2 в стакан 1 перед нагревом (комнатная температура — мартенситная фаза сплава); *е* — штыревой элемент и стакан при комнатной температуре после нагрева до 110 °C (угол между осями симметрии 0°, аустенитная фаза сплава)

В качестве сплава с ЭПФ выбрали никелид титана Ti-55,7wt%Ni. Температура начала его аустенитного превращения — A_s = 95 °C ± 5 °C. Определили три перечисленных ниже свойства.

1. Элементный состав. Для этого провели рентгенофлуоресцентный анализ с помощью прибора Shimadzu EDX-8000 (Япония).

2. Фазовый состав. Выполнили рентгенофазовый анализ с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000 (Япония). Параметры: Cu, Kα — 1,54 A^0, 40 кВ, 30 mA, диапазон углов 20–90°, скорость съемки 1град/мин.

3. Температура. Определили методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Работали с диапазоном 20–300 °C. Скорость нагрева — 5 град/мин.

Данный сплав позволяет продемонстрировать общие принципы самофиксации и самопозиционирования штыревого элемента в посадочном месте стакана при фазовом переходе из мартенсита в аустенит. При комнатной температуре сплав находится в мартенситной фазе.

Для запрессовки задействовали ручной пресс Nordberg. Стакан из сплава с ЭПФ нагревали техническим феном GHG 23–66 Bosch. Регулирование температуры позволяло неравномерно нагревать стакан и максимально имитировать технологический процесс монтажа на предприятиях. В частности, воссозданы худшие условия монтажа и работа при нарушениях технологического процесса.

Температура и зоны нагрева, а также прогрев по всей поверхности до заданной температуры отслеживались при помощи тепловизора Guide T120. Точность позиционирования определяли стационарным 3D-сканером со структурированным подсветом RangeVision DIY. Камеры Daheng обеспечили точность измерения 0,02 мм.

Ниже описана последовательность операций при установке штыревого элемента в стакан.

1. Штыревой элемент запрессовывается в глухое отверстие стакана. В результате отверстие дорнуется. Оно углубляется до тех пор, пока штыревой элемент не попадет в посадочную поверхность отверстия. Процесс проходит при комнатной температуре, соответствующей мартенситному фазовому состоянию сплава Ti-55,7wt%Ni с эффектом памяти формы.

2. Замеряется взаимное расположение деталей.

3. Стакан контролируемо нагревается до тех пор, пока температура не окажется выше, чем была в конце аустенитного превращения. При такой температуре восстанавливалась первоначальная (до деформации) форма стакана, а усилия от возникающих возвратных напряжений было достаточно для смещения и ориентирования штыревого элемента внутри глухого отверстия стакана. После этого стакан охлаждается до комнатной температуры.

4. Выполняется контрольный замер взаимного расположения деталей.

Штыревой элемент прессовали в стакан под разными углами между осями симметрии стакана и штыревого элемента. Размеры углов — от 0 до 12°. Шаг — 3°. Определялись соосность и угол отклонения между осями. Затем стакан нагревали до 110–120 °С и охлаждали различными способами — от свободного охлаждения на воздухе до принудительного (опусканием в воду). Затем делали контрольный замер соосности и угла отклонения между осями.

Результаты исследования. После запрессовки угол отклонения между осями стакана и штыревого элемента имел значения в диапазоне от 0,2° до 11° (угол α на рис. 2 *а*). Это говорит о том, что при жесткости конструкции и угле установки 0° все равно происходит некоторое смещение штыревого элемента в посадочном отверстии (от 0,2° до 0,5°).

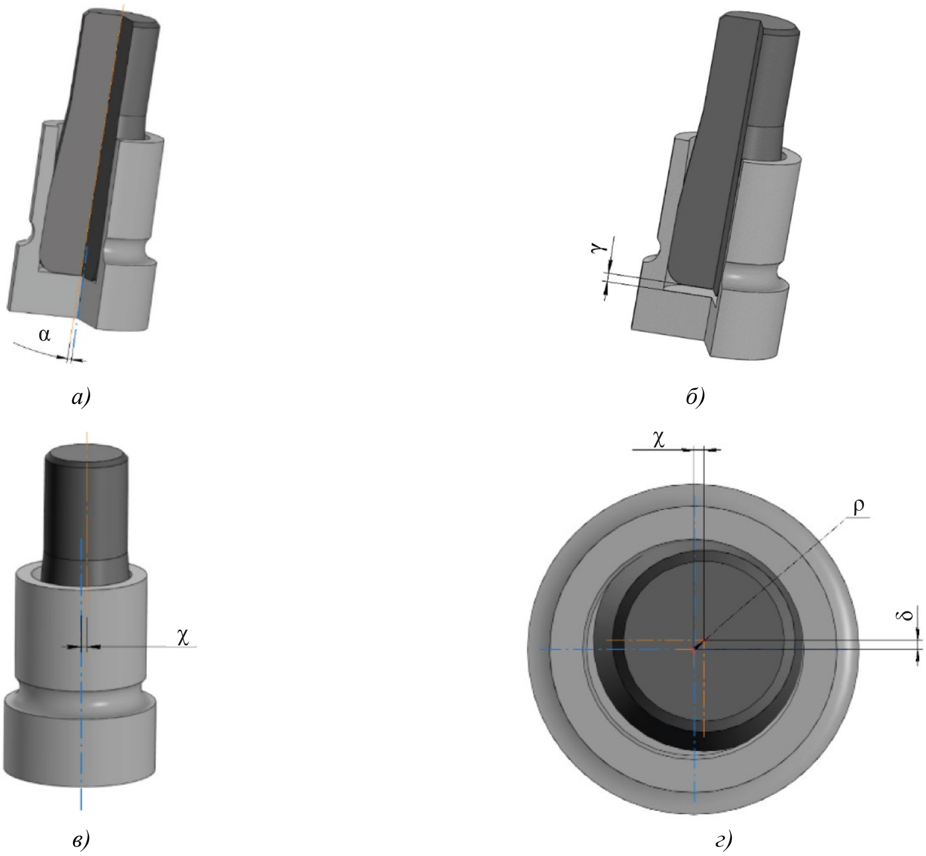


Рис. 2. Отклонения, возникающие при монтаже штыревого элемента в посадочное отверстие стакана:
а — угол между осями симметрии; *б* — смещение в результате недопрессовки;
в, г — смещение осей симметрии в плоскости сечения перпендикулярно осям симметрии штыревого элемента и стакана

https://vestnik-donstu.ru

Оси были смещены и не имели точки пересечения, как показано на рис. 2 *в* и 2 *г*. Если принять за центр ось стакана (точку отсчета), смещение оси штыревого элемента составит ρ = 0,2–0,8 мм (рис. 2 *г*), т. е. у штыревого элемента в стакане будет смещенное монтажное положение. В ряде случаев штыревой элемент был не полностью запрессован в стакан (рис. 2 *б*). Это, во-первых, обусловливает неравномерную деформацию металла вокруг отверстия. Во-вторых, говорит о том, что в результате запрессовки возникают различные по значению напряжения вдоль окружности отверстия. Такой узел при использовании быстро выйдет из строя.

Штыревой элемент занимает требуемое положение в отверстии стакана и относительно посадочного места отверстия после нагрева стакана до 110–120 °С, то есть при температуре выше, чем в конце обратного мартенситного превращения.

Точность позиционирования штыревого элемента в стакане исследовали с помощью стационарного 3D-сканера со структурированным подсветом RangeVision DIY и с камерами Daheng. Зафиксировали угловое отклонение осей в диапазоне 0,03–0,1°. Максимальное значение несоостности составило 0,04 мм, что соответствует высокой точности позиционирования для сборочных единиц.

Следует отметить схожесть двух механизмов, которые обеспечивают:

– занятие конструктивно требуемого положения штыревого элемента в отверстии стакана;

– действие рабочего органа, изготовленного из сплава с ЭПФ силового двигателя.

Заданная форма детали из сплава с ЭПФ стакана в аустенитном состоянии соответствует форме, при которой штыревой элемент точно занимает положение, необходимое по конструкции узла. При температуре, соответствующей мартенситному фазовому состоянию, механические характеристики сплава ниже, чем при температуре, соответствующей аустениту. В этом случае можно задать форму, в которую легко вмонтируется штыревой элемент. При таком монтаже позиционирование штыревого элемента не соответствует требуемому.

Последующий нагрев стакана в результате обратного мартенситного превращения создает внутренние напряжения, которые позволяют вернуть первоначальную форму. Их можно условно назвать возвратными напряжениями. При этом:

– стакан приобретает форму, соответствующую эксплуатационным геометрическим характеристикам;

– усилия, возникающие в результате действия возвратных напряжений, достаточны для перемещения, ориентирования, установки и позиционирования штыревого элемента в посадочном месте стакана (он располагается и фиксируется в отверстии).

Как видим, именно детали обеспечивают самопозиционирование и самофиксацию. Не нужны ни специальная оснастка, ни особенные монтажные приемы.

Есть процесс, схожий с описанным выше. Для приведения в движение механизма развертывания антенн спутников силовой привод использует усилие, развиваемое возвратными напряжениями при обратном мартенситном превращении рабочего элемента, изготовленного из сплава с ЭПФ.

Обсуждение и заключение. Перемещение штыревого элемента внутри посадочного отверстия стакана обеспечивается конструктивными особенностями, которые можно применить для всех сопрягаемых деталей при самопозиционировании и самофиксации за счет эффекта памяти формы сплавов с термоупругими фазовыми превращениями. Ниже перечислены приемы, которые позволяют добиться необходимых конструктивных особенностей:

– отказ от резких линий переходов между поверхностями деталей в пользу более плавных;

– выбор скругленных или с переменным радиусом фасок и внешних углов;

– замена внутренних углов галтелями или кривыми с переменным радиусом;

– качественная очистка поверхности, исключение заусенцев.

Следует учитывать данные требования при проектировании. Это позволит обеспечить необходимое взаимное перемещение деталей со значительно меньшим усилием. В данном случае усилие сравнивается с тем, которое дают возвратные напряжения при обратном мартенситном превращении сплава с термоупругими фазовыми превращениями (из такого материала изготовлен стакан).

Самофиксация и самопозиционирование способны обеспечить точность сборки, исключить монтажные и технологические неточности при сборочных работах, сократить брак. Использование некоторых сплавов имеет экономический смысл, то есть работает на рентабельность производства конечного продукта [11]. Эти и другие преимущества описанного в статье подхода могут быть реализованы в станкостроении. Метод представляется полезным для разработки нефтегазового, прецизионного и иного оборудования с высокими требованиями к геометрической точности деталей.

Список литературы / References

1. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Технологическое обеспечение сборки на основе принципов выявления критичных требований к высокоточным изделиям. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(1):66–77. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-66-77

Nazaryev AV, Bochkarev PYu. Improving the Principles of Identifying Critical Requirements for the Assembly of High-Precision Products. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):66–77. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-66-77

2. Анурьев В.И. *Справочник конструктора-машиностроителя*. В 3 т. Т. 1. 8-е изд. Москва: Машиностроение; 2001. 920 с. URL: https://www.prugini-spb.ru/anuriev/Anuriev_T1.pdf (дата обращения: 06.06.2024).

Anur'ev VI. *Handbook of a Mechanical Designer.* In 3 vol. Vol. 1. 8th ed. Moscow: Mashinostroenie; 2001. 920 p. (In Russ.) URL: https://www.prugini-spb.ru/anuriev/Anuriev_T1.pdf (accessed: 06.06.2024).

3. Малинин В.Г., Муссауи Ю.Ю., Бурдин Ю.А. Вопросы практического применения материалов с памятью формы для усиления строительных конструкций. *Строительство и реконструкция.* 2017;70(2):23–31.

Malinin V, Moussaoui Yu, Burdin Yu. The Application of Shape Memory Alloys for Civil Structures Reinforcement. *Building and Reconstruction.* 2017;70(2):23–31.

4. Агиней Р.В., Некучаев В.О., Семиткина Е.В., Терентьева М.В. Возможности применения инновационных материалов с памятью формы в нефтяной промышленности. *Нефтегазовое дело.* 2020;18(1):39–47. http://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-1-39-47

Aghiney RV, Nekuchaev VO, Semitkina EV, Terentyeva MV. Opportunities for Using Innovative Shape Memory Effect Materials in Oil Industry. *Petroleum Engineering.* 2020;18(1):39–47. http://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-1-39-47

5. Duerig TW, Pelton AR, Bhattacharya K. The Measurement and Interpretation of Transformation Temperatures in Nitinol. *Shape Memory and Superplasticity.* 2017;3:485–498. http://doi.org/10.1007/s40830-017-0133-0

6. Шишкин С.В., Махутов Н.А. *Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы.* Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований; 2019. 411 с.

Shishkin SV, Makhutov NA. *Calculation and Design of Power Structures on Alloys with Shape Memory Effect.* Izhevsk: RDE “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, Institute of Computer Research; 2019. 411 p. (In Russ.)

7. Барвинок В.А, Богданович В.И, Грошев А.А. Плотников А.Н., Ломовской О.В. Методика проектирования силовых приводов из материала с эффектом памяти формы для ракетно-космической техники. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2013;15(6):272–277.

Barvinok VA, Bogdanovich VI, Groshev AA, Plotnikov AN, Lomovsky OV. Design Method of Power Drives from Material Shape Memory Effect for Rocket and Space Technology. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science.* 2013;15(6):272–277.

8. Андронов И.Н., Семиткина Е.В. Применение муфты переменного диаметра из материала с памятью в качестве соединительного элемента на промысловых трубопроводах. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море.* 2017;(11):20–27.

Andronov IN, Semitkina EV. Use of a Variable-Diameter Coupling Manufactured from Some Material with Memory as a Connecting Element on Fields Flowlines. *Onshore and Offshore Oil and Gas Well Construction.* 2017;(11):20–27.

9. Ломовской О.В., Вашуков Ю.А., Белашевский Г.Е., Богданович В.И., Барвинок В.А. Сборка элементов трубопроводов с применением технологического оснащения с силовым приводом из сплава с эффектом памяти формы. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2003;(3):4.

Lomovskoy OV, Vashukov YuA, Belashevskiy GE, Bogdanovich VI, Barvinok VA. Assembly of Pipeline Elements Using Technological Equipment with a Power Drive Made of Alloy with Shape Memory Effect. *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making.* 2003;(3):4. (In Russ.)

10. Ruban DA, Cherkesov TA, Balaev EYuO, Gerasimov DV. Use of Materials with Shape Memory Effect to Improve the Performance Properties of Parts of Drill String. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies.* 2019;775:102–112. https://doi.org/10.1088/1757-899X/775/1/012122

11. Терехин А.Г. О материалах с эффектом памяти и особенностях их применения. *Инновации и инвестиции.* 2020;(6):222–223.

Terekhin AG. About Materials with a Memory Effect and Features of Their Application. *Innovations and Investments.* 2020;(6):222–223.

Об авторе:

Эътибар Юсиф Оглы Балаев, старший научный сотрудник кафедры нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), инженер по изобретательской и патентной деятельности ООО «Промышленно-инженерная компания» (350080, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Уральская, 144), SPIN-код, ORCID, ScopusID, balaev1122@mail.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Etibar Yusif Ogly Balaev, Senior Research Fellow of the Department of Oil and Gas Engineering named after Prof. GT Vartumyan, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), Invention and Patent Engineer, Industrial-Engineering Company LLC (144, Uralskaya Str., Krasnodar, 350080, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, balaev1122@mail.ru

Conflict of Interest Statement: **the author declares no conflict of interest.**

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 25.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 18.07.2024
Принята к публикации / Accepted 01.08.2024